

Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación

VOLANTE, J.¹; MOSCIARO, J.¹; MORALES POCLAVA, M.¹; VALE, L.¹; CASTRILLO, S.²; SAWCHIK, J.³; TISCORNIA, G.⁴; FUENTE, M.⁵; MALDONADO, I.⁵; VEGA, A.⁵; TRUJILLO, R.⁶; CORTÉZ, L.⁶; PARUELO, J.⁷

RESUMEN

En Sudamérica ocurrieron, en las últimas décadas, grandes transformaciones del paisaje. Como consecuencias de mejoras tecnológicas, nuevas condiciones en el mercado y precios internacionales, tanto pastizales como bosques o arbustales fueron transformados, principalmente para la producción de soja con fines de exportación. A partir de teledetección y Sistemas de Información Geográfica se analizaron series temporales de productos del sensor MODIS y se detectaron los principales sistemas de cultivos de 5 países de Sudamérica. Se cartografiaron las áreas de cultivos anuales para los ciclos productivos 2000/01 y 2010/11, se evaluaron de manera espacialmente explícita los cambios ocurridos entre los mencionados ciclos y se elaboraron hipótesis a fin de entender dichos procesos de cambios. Se observó un incremento del 43% de la superficie cultivada entre ciclos, con una distribución espacial heterogénea. Los cambios más destacables a nivel regional fueron la disminución del 66% en la superficie ocupada con cultivos de invierno como práctica única, y los incrementos del 62% y 52% en la superficie de los cultivos de verano y doble cultivos, respectivamente. La metodología planteada fue adecuada para llevar a cabo análisis que combinan una gran extensión de territorio y tiempo.

Palabras clave: cambios de uso; serie temporal; ndvi; sensores remotos; transformaciones del paisaje.

ABSTRACT

In South America major landscape transformations occurred in the last decades as a consequence of technological improvements and new international market and prices conditions. Grasslands, shrublands and forests were cleared mainly for soybean production for export. Based on remote sensing and GIS techniques,

¹INTA Estación Experimental Agropecuaria Salta. Laboratorio de Teledetección y SIG. Ruta Nac. 68, km 172; Cerrillos (4403). Salta, Argentina. Correo electrónico: volante.jose@inta.gob.ar

²Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Salta. Complejo Universitario Gral. San Martín - Av. Bolivia 5150 (4400). Salta, Argentina. Correo electrónico: ale_2476@yahoo.com.ar

³INIA Estación Experimental La Estanzuela. Ruta 50, Km 11. Colonia, Uruguay. Correo electrónico: iniale@le.inia.org.uy

⁴INIA Estación Experimental Las Brujas. Ruta 48, km 10. Rincón del Colorado, Uruguay Correo electrónico: inia_lb@inia.org.uy

⁵INIA Estación Experimental Quilamapu. Vicente Méndez 515, Chillán. Casilla 426. Chile Correo electrónico: Infoquilamapu@inia.cl

⁶ANAPO. Av. Ovidio Barbery esquina Jaime Mendoza. Santa Cruz, Bolivia. Correo electrónico: rtrujillo@anapolibolia.org

⁷CONICET y Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección. Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas vinculadas a la Agricultura, Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: paruelo@agro.uba.ar

we analyzed MODIS products time series, to detect the major cropping systems in 5 countries of South America. We mapped annual crop areas for the 2000/01 and 2010/11 growing seasons, we evaluated in a spatially explicit way the changes between these periods, and we developed hypotheses in order to understand the changes. There was a 43% increase in the cropped area between growing seasons, with a heterogeneous spatial distribution. The most notable changes at the regional level were a 66% decreased in the area cover by winter crops as unique practice, and increases of 62% for summer crops and 52% in the double cropped area. The methodology used was adequate to carry out analyses that combine a large expanse of territory and time.

Keywords: *land use change; time series; ndvi; remote sensing; landscape transformation.*

INTRODUCCIÓN

El importante crecimiento demográfico de los últimos siglos y la consecuente búsqueda de nuevas tierras para la producción de alimentos promovió una rápida transformación de la cobertura y uso del suelo en los ecosistemas terrestres. Se entiende por “cobertura del suelo” al tipo de cubierta biofísica observada en la superficie de la tierra, mientras que “uso de suelo” describe actividades que la sociedad realiza en un territorio para modificar o conservar su estado (Di Gregorio y Jansen 1998). En la actualidad, los cambios en la cobertura y el uso del suelo son uno de los principales motores del “cambio global” que pueden apreciarse a diferentes escalas de estudio (Duarte, 2006).

Estos cambios generan efectos importantes a nivel local, con consecuencias a escala regional y global, ya que influyen en la biodiversidad, el clima, los ciclos del agua, el carbono y el nitrógeno (Vitousek *et al.*, 1997; Austin *et al.*, 2006). La conversión de ecosistemas naturales a tierras agropecuarias tiene consecuencias como la pérdida de hábitat y biodiversidad, la reducción de la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos y la transformación del paisaje (Paruelo *et al.*, 2006; Volante *et al.*, 2012).

Gran parte de los cambios en la cobertura y el uso del suelo se producen a expensas de bosques nativos. De acuerdo a informes de la FAO (2011), entre el año 2000 y 2010 se registró una tasa de deforestación anual del -0,46% en América Latina y los países del Caribe donde la principal causa fue la conversión de tierras forestales a la agricultura. Este proceso ha afectado principalmente a tres ecosistemas: El Cerrado en Brasil (Morton *et al.*, 2006), la selva de Chiquitanos en Bolivia (Steininger *et al.*, 2001) y el Gran Chaco Americano en Bolivia, Paraguay y Argentina (Zak *et al.*, 2004; Boletta *et al.*, 2006). En otras partes de la porción sur del continente las transformaciones estuvieron asociadas a la intensificación de la actividad agrícola, al reemplazo de rotaciones agrícola-ganaderas por agricultura continua, a la implantación de eucaliptos y pinos y a la eliminación de pastizales naturales. En las extensas planicies sudamericanas, estas transformaciones se asociaron a cambios tecnológicos y a nuevas condiciones en el mercado y precios internacionales (Baldi y Paruelo, 2008), donde tanto pastizales como bosques semiáridos fueron transformados principalmente para la producción de soja

con fines de exportación hacia China y la Unión Europea (Dros, 2004).

Entender la dinámica de estos cambios con una resolución espacial tal que permita vincular las transformaciones con los distintos factores determinantes por un lado, y con las consecuencias ambientales, sociales y económicas por otro, es prioritario en el diseño de políticas y en la toma de decisiones. Los datos provistos por sensores remotos han demostrado su utilidad para caracterizar grandes territorios por su capacidad de relevar áreas extensas con cierta regularidad y extensión temporal y espacial. En los últimos 15 años, datos provenientes del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo del satélite Terra, de alta resolución temporal (1 día) y resolución espacial intermedia (250 m) (Justice y Townshend, 2002) permitieron evaluar cambios de cobertura de suelo asociados a causas antrópicas y naturales en distintas regiones del planeta (Morton *et al.*, 2006; Hansen *et al.*, 2002; Clark *et al.* 2010).

Guerschman (2005) y Wardlow *et al.* (2007) utilizaron productos de imágenes MODIS para el relevamiento de los principales cultivos de la región pampeana de Argentina y del Valle Central de EE.UU., respectivamente. Para ello, utilizaron protocolos basados en análisis de series temporales de índices de vegetación (IV) registrados con frecuencia quincenal. Estas permiten estudiar el comportamiento estacional de la vegetación y discriminar clases de cubiertas vegetales, identificando patrones de funcionamiento característicos o “firmas fenológicas”, que corresponden a la dinámica de la interceptación de radiación por parte del canopy.

Los protocolos utilizan imágenes sintéticas elaboradas a partir del sensor MODIS (producto MOD13Q1), de resolución espacial de 250 m y frecuencia temporal de 16 días, que ofrecen información de dos índices de vegetación: el Normalizado (NDVI) y el Mejorado (IVM). Estos IVs proporcionan una constante cobertura espacial y temporal de las condiciones de la vegetación y se complementan para estudios de dinámica de la vegetación (Huete *et al.*, 2002).

El NDVI es un buen estimador lineal de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes (Sellers *et al.*, 1992) y por lo tanto un elemento clave para la estimación de las ganancias de C de las coberturas vegetales (Paruelo, 2008). El IVM fue diseñado para minimizar los efectos de la atmósfera y del suelo

que contaminan el NDVI (Huete *et al.*, 1997), y para realzar la señal de la vegetación (Huete *et al.*, 2002). Gao *et al.* (2000) encontraron que el NDVI es más sensible a la clorofila, por lo que se satura a niveles altos de biomasa, mientras que el IVM es más sensible a las variaciones de la estructura del canopy (por ejemplo, índice de área foliar, la fisonomía vegetal y el tipo de cubierta) y tiene más sensibilidad sobre áreas con alto nivel de biomasa, por lo que se considera apropiado para estudiar las zonas agrícolas y las áreas de bosques densos y selva (Wardlow *et al.*, 2007).

Los objetivos del presente trabajo son a) presentar una metodología que, a partir del análisis de firmas fenológicas, permita cartografiar las áreas de cultivos anuales para los ciclos productivos 2000/01 y 2010/11 de Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay; b) evaluar de manera espacialmente explícita los cambios ocurridos entre los mencionados ciclos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende una superficie de 5.232.392 km² de la región sur del continente americano, que incluye a los países de Bolivia, Argentina, Paraguay, Uruguay y Chile, entre los 9° 50' y 52° 22' de latitud sur y entre 73° 35' y 53° 9' de longitud oeste, (fig. 1).

Esta región se caracteriza por tener gran diversidad de ambientes, que incluyen el trópico de Los Llanos bolivianos, el polar de la cordillera de los Andes, el frío seco de la Patagonia, el subtropical del Chaco, el templado húmedo de los pastizales del Río de la Plata y la aridez del desierto de Atacama. Entre estos extremos existen también grandes áreas con ambientes que permiten el desarrollo de actividad agropecuaria influenciada por aspectos orográficos y disponibilidad de agua para riego, entre otros factores.

Los principales cultivos anuales desarrollados en el área de estudio son: soja (*Glycine max*), maíz (*Zea mays*), arroz (*Oryza sativa*), poroto (*Phaseolus vulgaris* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), trigo (*Triticum aestivum*) y girasol (*Helianthus annuus*). Cada cultivo tiene un calendario de fechas de siembra y cosecha, y diferentes patrones de crecimiento estacional, dependiente de las condiciones climáticas locales y de la latitud. Este patrón de crecimiento define una firma fenológica o marcha estacional de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes (RFAA) particular para cada tipo de cultivo (fig. 2). La RFAA puede estimarse a partir de Índices de vegetación como el NDVI o el IVM.

Base de datos

Para describir patrones de uso de la tierra en el área de estudio y sus cambios en los últimos 10 años (de 2000 a 2010) se consideraron dos periodos anuales que iniciaban el 25 de mayo de un año y finalizaban el 24 de mayo del año siguiente (2000-2001 y 2010-2011). De esta forma se comienza y finaliza la estación de crecimiento en un momento

en el que en la región del norte del área de estudio se prepara la siembra de los cultivos de ciclo invierno-primaveral y se ha finalizado la cosecha de los cultivos estivales. Para cubrir el área de estudio se necesitaron 10 escenas (tiles) (fig. 1), y en cada una de ellas se utilizaron 23 imágenes con datos de IVM (series temporales de IVM) para cada periodo de análisis correspondientes a los ciclos de cultivos 2000/01 y 2010/11. Las imágenes son compuestas de máximo valor (CMV) del producto MOD13Q1, derivado de imágenes MODIS, elaborado y publicado por la NASA (https://lpdaac.usgs.gov/data_access), formados por los mayores valores diarios de cada píxel durante un periodo de 16 días. Este producto incluye además información acerca de la calidad del valor del IVM de cada píxel (Justice *et al.*, 1998) dependiente principalmente de las condiciones atmosféricas (por ej. presencia de nubes, aerosoles, nieve, etc.) registradas en el momento de la adquisición de la imagen. La calidad describe el grado de fiabilidad que el usuario puede tener al utilizar cada píxel de la imagen. Los píxeles con calidades etiquetadas como "No fiables" fueron considerados datos faltantes. Las imágenes MODIS tienen alta precisión de geolocalización por lo que la influencia de cambios de IVM debido a imprecisiones geométricas entre observaciones es mínima (Wardlow *et al.*, 2007).

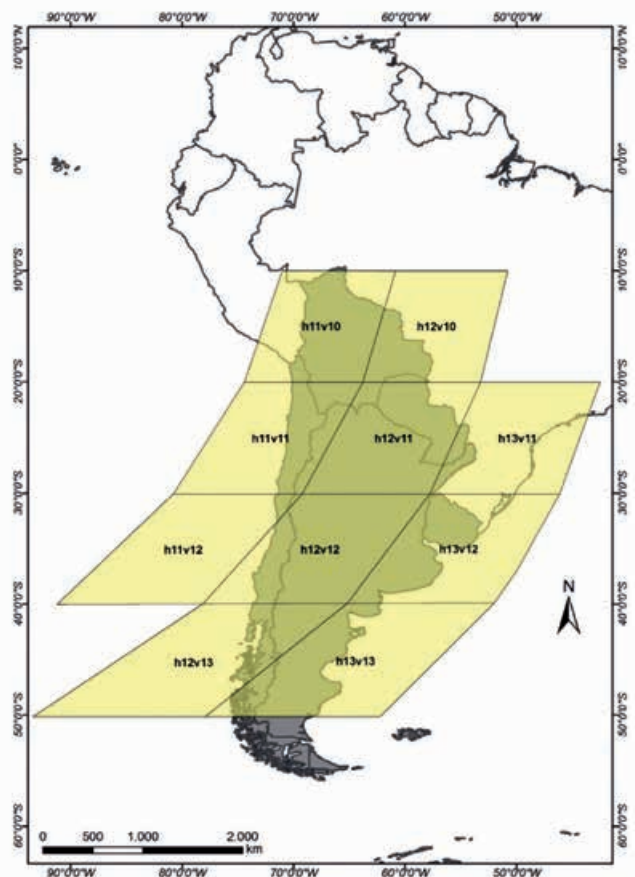


Figura 1. Área de estudio con escenas de imágenes MOD13Q1 utilizadas.

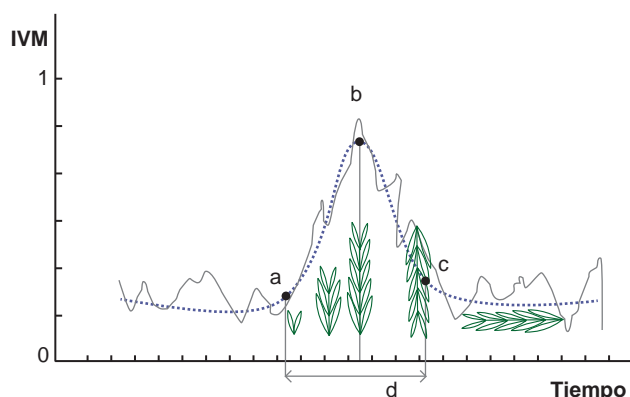


Figura 2. Las líneas describen series temporales de IVM asociadas a distintas etapas del ciclo de crecimiento vegetal. El punto (a) representa la fecha y el valor de IVM al inicio del ciclo de crecimiento; (b) el momento y valor de IVM de máxima actividad fotosintética; (c) el momento y valor de IVM al fin del ciclo; y (d) duración del ciclo de crecimiento. La línea continua representa la serie temporal de IVM con datos originales y la línea punteada representa el IVM ajustado a modelos basados en mínimos cuadrados.

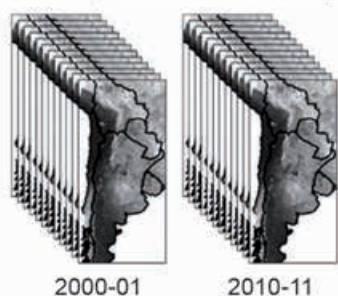
Teniendo en cuenta que las precipitaciones son condicionantes del grado de expresión de los cultivos, se evaluaron las precipitaciones de los años 2000 y 2010 con relación al promedio de la década. Para ello se utilizaron datos men-

suales de precipitación obtenidos de la misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM del inglés Tropical Rain Monitoring Mission) de archivos con una resolución espacial de 0.25 por 0.25 grados (producto 3B43, V6) distribuida por la NASA (Goddard Earth Science (GES) Data and Information Service Center). Las anomalías se calcularon como desviación relativa de cada año hidrológico (de junio a mayo) con respecto al promedio del periodo 2000–2010 de la siguiente manera: (promedio de largo plazo-año en particular)/promedio de largo plazo *100.

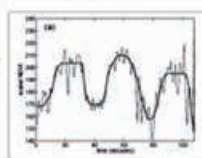
Clasificación de cultivos y detección de cambios

Para la cartografía de cultivos se siguió la aproximación metodológica utilizada por Guerschman (2005) para la región pampeana argentina, con modificaciones durante la etapa de preprocesamiento de las series temporales, para la remoción de datos espurios producidos generalmente por condiciones atmosféricas adversas. La lógica del método de clasificación se basa en asociar un patrón fenológico a un cultivo (fig. 2). En tal sentido el método identifica patrones fenológicos, o sea una dinámica particular del funcionamiento de la vegetación, que luego se etiquetan basándose en clases de cobertura según el conocimiento experto. El método se apoya en la idea de Tipos Funcionales de Ecosistemas (Paruelo *et al.*, 2001, Alcaraz-Segura *et*

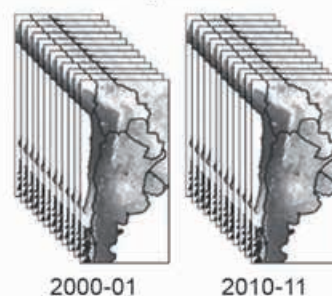
Serie temporales de IVM sin ajustar



Ajuste

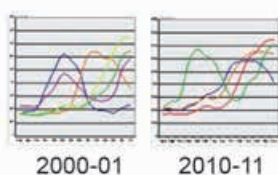


IVM ajustado



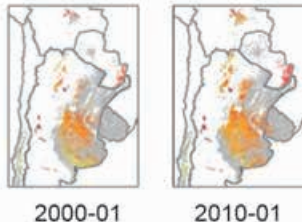
Clasificación

Patrones fenológicos



Asignación de clases

Mapas de cultivos



Mapas de cambios

Detección de cambios

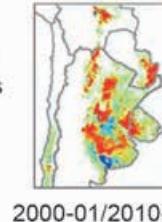


Figura 3. Secuencia metodológica para la obtención de mapas de cultivos y mapas de cambio.

al., 2013) en donde se agrupan porciones de terreno (píxeles) con una dinámica similar de ganancias de C.

Una vez realizados los mapas de cultivos para los dos periodos, se realiza una secuencia de pasos para la obtención de los mapas de cambio entre periodos (fig. 3).

Preprocesamiento de series temporales de IVM

Esta etapa comprende la eliminación de datos espurios o ruidos de las series temporales producidos generalmente por problemas atmosféricos en el momento de adquisición de las imágenes. Estos ruidos actúan como fuente de error en la etapa de clasificación y por ello es conveniente su depuración. Para ello se utilizó el programa Timesat 3.0 (Jönsson y Eklundh, 2004), el cual permite remover ruidos y estimar datos faltantes mediante el ajuste de la serie de datos originales a modelos de regresión basados en mínimos cuadrados utilizando la información de calidad de pixel contenidas en las imágenes MOD13Q1 (reliability band) (fig. 3). La selección de los modelos de ajuste y sus parámetros se realizan de manera empírica, y en este caso en particular utilizamos el modelo doble logístico, con potencia de ajuste=2; corte de estación=0; y comienzo y final de estación=20% por considerar que este tipo de función se adecua mejor a comportamientos fenológicos muy variables (ver Jönsson y Eklundh, 2004) como los observados en el área de estudio. El producto de salida de este proceso (imagen ajustada) es una nueva base de datos en donde cada pixel de la imagen posee una serie temporal suavizada, libre de valores extremos y valores faltantes.

Clasificación y extracción de patrones fenológicos

Se realizaron mapas de uso de la tierra para las campañas agrícolas 2000/01 y 2010/11 tomando en cuenta cuatro categorías: a) *cultivos de invierno*; b) *cultivos de verano*; c) *doble cultivo*; y d) *misceláneos no agrícolas*. Esta última categoría incluye a las cubiertas no vegetadas (naturales y artificiales), superficies con vegetación natural (bosques, arbustales, pastizales, etc.) y pasturas para ganadería. Los mapas se realizaron a partir de clasificaciones no supervisadas de las imágenes de IVM ajustadas de cada uno de los periodos utilizando el algoritmo ISODATA con cincuenta clases.

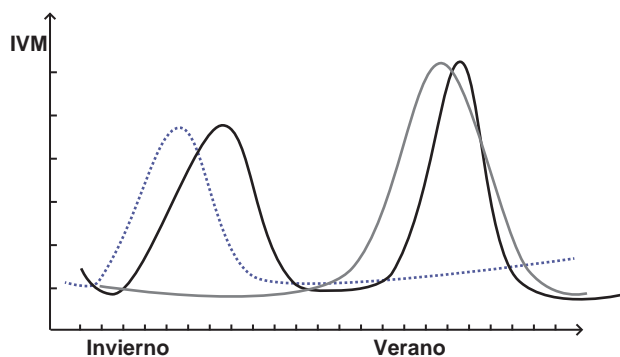


Figura 4. Comportamiento anual del IVM en cultivos de verano (línea gris continua), de invierno (línea punteada) y en doble cultivo (línea negra continua).

A continuación se graficaron las firmas fenológicas de cada clase, asignándolas a clases de uso de la tierra, de acuerdo a un conjunto de reglas de decisión. Se clasificó como cultivos a todas aquellas clases cuyas curvas promedio de IVM mostraron periodos de activo crecimiento (IVM mayor a 0.4) seguido por otro periodo de bajos valores de IVM (entre 0.2 y 0.3). Este comportamiento estacional se puede producir en verano, en invierno, o en ambos periodos. Por lo que se clasificó como *cultivos de verano* a las clases que tuvieron un patrón unimodal, con valor máximo en los meses de diciembre a marzo; mientras que las clases de igual patrón, pero con máximo valor registrado en junio a octubre fueron asignadas a la clase *cultivos de invierno*. Se clasificó como *doble cultivo* a las clases de patrón bimodal, que mostraron activo crecimiento en el verano y en el invierno (fig. 4). Las clases que no cumplían con estas reglas fueron asignadas a la categoría *misceláneos no agrícolas*.

Análisis de cambios ocurridos entre 2000/01 y 2010/11

Para analizar cambios ocurridos en el periodo de estudio, se realizó una "clasificación delta" o detección de cambios posclasificación (Coppin *et al.*, 2004; Xiuwan, 2002; Townshend *et al.*, 1992). Este método requiere *a priori* de mapas

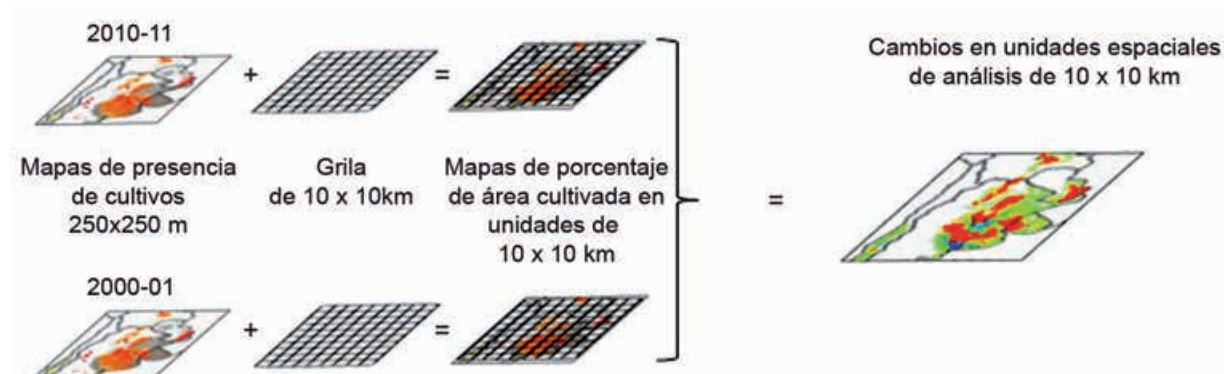


Figura 5. Algoritmo para la confección de los mapas de cambios de cada categoría.

País	Sistemas de cultivo	Superficie (miles de ha)		Variación (miles de ha)	(%)
		2000/01	2010/11		
Argentina	Invierno	2.994	1.003	-1.991	-66%
	Verano	15.885	25.801	9.916	62%
	Doble	3.796	4.449	653	17%
	Total efectiva	26.471	35.701	9.230	35%
Bolivia	Invierno	0	0	-	-
	Verano	186	1.211	1.025	551%
	Doble	354	409	55	16%
	Total efectiva	894	2.028	1.134	127%
Chile	Invierno	475	491	16	3%
	Verano	135	145	10	7%
	Doble	6	44	38	633%
	Total efectiva	621	724	103	17%
Paraguay	Invierno	0	0	-	-
	Verano	706	281	-425	-60%
	Doble	794	1.963	1.169	147%
	Total efectiva	2.294	4.207	1.913	83%
Uruguay	Invierno	306	0	-306	-100%
	Verano	122	990	868	711%
	Doble	109	685	576	528%
	Total efectiva	647	2.359	1.712	265%
Total área de estudio	Invierno	3.775	1.494	-2.281	-60%
	Verano	16.848	27.217	10.369	62%
	Doble	4.705	7.141	2.436	52%
	Total	30.033	42.991	12.958	43%

Tabla 1. Superficies cultivadas en las campañas agrícolas 2000/01 y 2010/11 estimadas a partir de teledetección (expresadas en miles de ha).

Cultivos	Teledetección		FAOSTAT		Variación (%)	
	2001	2011	2001	2011	2001	2011
Invierno	8834000	9044000	8893000	7905000	-0,7	14,4
Verano	22093000	35978000	20926000	34433000	5,6	4,5
Total	30927000	45022000	29819000	42338000	3,7	6,3

Tabla 2. Superficie cultivada (ha) estimada por teledetección y estadísticas reportados por FAO (FAOSTAT; <http://faostat.org>). Variación

de presencia/ausencia de las categorías de cada periodo, para ser comparados por medio de superposición cartográfica. Los cambios se evaluaron en unidades espaciales de análisis determinadas por una grilla regular con celdas de 10 km de lado (10.000 ha) (Mitchell, 2005), en las que se cuantificó el porcentaje de área ocupada por cada categoría.

Los cambios ocurridos entre periodos surgen de la diferencia de superficies ocupadas en cada celda entre los años

2000/01 y 2010/11, expresados en porcentajes de la superficie de la unidad de análisis (10.000 ha). Se interpretan como “cambios relevantes” los superiores a 2,5% (250 ha) en valores absolutos. Se estimaron cambios para cada categoría y para la superficie efectiva total (fig. 5) calculada como la suma de las superficies de cultivos de verano, más la de invierno, más la correspondiente a doble cultivo multiplicada por dos, ya que es utilizada dos veces en el ciclo productivo.

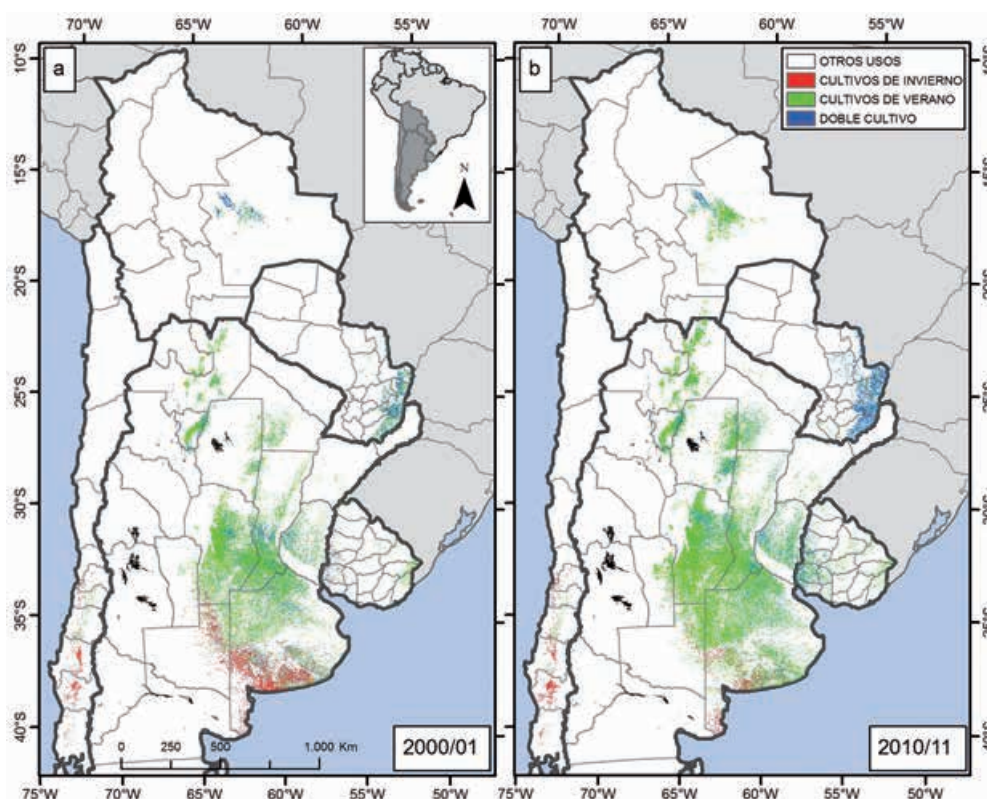


Figura 6. Distribución de los cultivos de verano, de invierno y doble cultivo en dos momentos (2000/01 y 2010/11). En rojo presencia de cultivos de invierno; verde: cultivos de verano; y azul: doble cultivo).

Evaluación

La verificación de la calidad cartográfica de los mapas se realizó según los trabajos de Cohen *et al.* (1998, 2002), en los que se comparan mapas resultantes de clasificaciones digitales, con datos provenientes de interpretación visual de imágenes. Debido a que no se contó con experiencia e información de campo suficiente para toda el área de estudio, se evaluó únicamente la región del noroeste argentino en la que existe amplio conocimiento sobre los trabajos realizados en PRORENOA-INTA (Proyecto de relevamiento de cultivos del Noroeste Argentino, disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/monitoreo-de-cultivos-del-noroeste-argentino-a-traves-de-sensores-remotos/>). Se seleccionaron al azar 5 áreas de muestreo de 10 km² denominadas "segmento". Cada segmento cumplió con la condición de poseer entre 40 y 60% de superficie agrícola. En cada segmento se seleccionaron 20 sitios (puntos de referencia) distribuidos geográficamente al azar y maximizando la separación entre ellos para reducir el riesgo de pseudoreplicación (Hurlbert, 1984) producido por autocorrelación espacial (Dormann, 2007).

Los puntos de evaluación fueron etiquetados mediante interpretación visual, sobre imágenes Landsat de los años 2000 y 2010, con las categorías a) cultivos de verano, b) cultivos de invierno y c) doble cultivo. Posteriormente, se comparó el grado de acierto entre puntos de evaluación y los mapas a partir del índice de Fiabilidad Global cartográfica

(calculado como: $\sum \text{puntos coincidentes} \div \sum \text{de puntos muestreados} \times 100$) (Chuvieco, 2002). Este cálculo arrojó una fiabilidad global del 79 y 81% para los ciclos 2000-01 y 2010-11 respectivamente. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos con los reportados por la Dirección de Estadística de la FAO (FAOSTAT; disponibles en: <http://faostat3.fao.org>).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el área de estudio se cultivaron 30 millones de ha en el ciclo 2000/01 y 42,9 millones en 2010/11 (tabla 1), lo que representa un incremento de la superficie cultivada del 43% con respecto al primer ciclo. Esta superficie se refiere a la superficie total efectiva, en la que el doble cultivo se cuenta por dos. El incremento no ha sido proporcional en cuanto a su distribución espacial y los tipos de uso de suelo analizados (fig. 6). Los cambios más destacables a nivel regional son: la disminución de cultivos de invierno como práctica única, con una caída del 66% en toda la región (disminución de 2,2 millones de ha), el incremento del 62% de los cultivos de verano (aumento de 10,4 millones de ha) y el aumento de la superficie de doble cultivos en un 52% (aumento de 2,4 millones de ha).

El área de estudio posee gran variedad de climas y sistemas productivos, reflejados en las diferentes firmas fenológicas (diversidad funcional) obtenidas para cada región y país analizado. La configuración de las firmas fenológicas

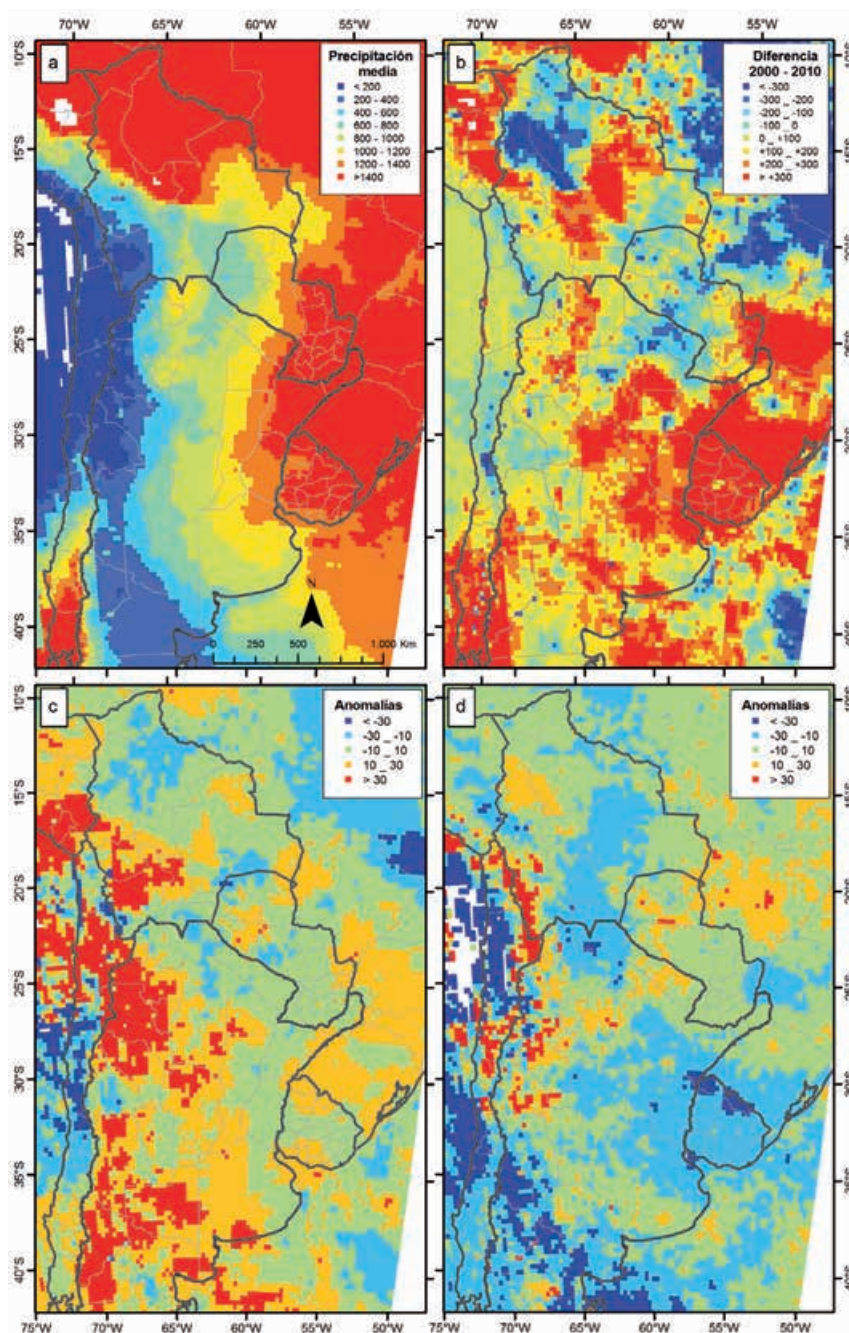


Figura 7. (a) Precipitaciones anuales promedio del periodo 2000/01-2010/11 (mm/año); (b) Diferencia de precipitaciones (mm/año) entre años hidrológicos, calculado como las precipitaciones anuales del ciclo 2000/01 menos las precipitaciones anuales del ciclo 2010/11; (c) Anomalías de precipitaciones (%), calculadas como el desvío relativo de cada año hidrológico (junio a mayo) respecto de la media de largo plazo (año 2000) y (d) Anomalías de precipitaciones (%) del año 2011: Fuente: Producto 3B43, V6 de precipitaciones de la TRMM43, distribuido por la NASA (GES Data and Information Services Center).

obtenidas para cada país fue similar entre años, a pesar de la diferencia de precipitaciones ocurridas en los dos periodos estudiados. En la mayor parte de la región, estas diferencias superaron los 200 mm (fig. 7b) como resultado de la ocurrencia de anomalías húmedas para el ciclo 2000/01 y anomalías secas para el año 2010/11 (fig. 7c y d).

En general los ciclos húmedos permiten expresar el potencial genético de los cultivos, lo que facilita diferenciarlos

de otras cubiertas no agrícolas (vegetación natural). En contraposición, los ciclos secos incrementan las probabilidades de error de detección, ya que los cultivos se expresan con menor intensidad y sus curvas fenológicas pueden confundirse con cubiertas vegetales naturales. Esta razón podría explicar las mayores discrepancias con datos reportados por FAO (FAOSTAT; <http://faostat.fao.org/>) observadas en el ciclo 2010/11 (tabla 2 y fig. 8).

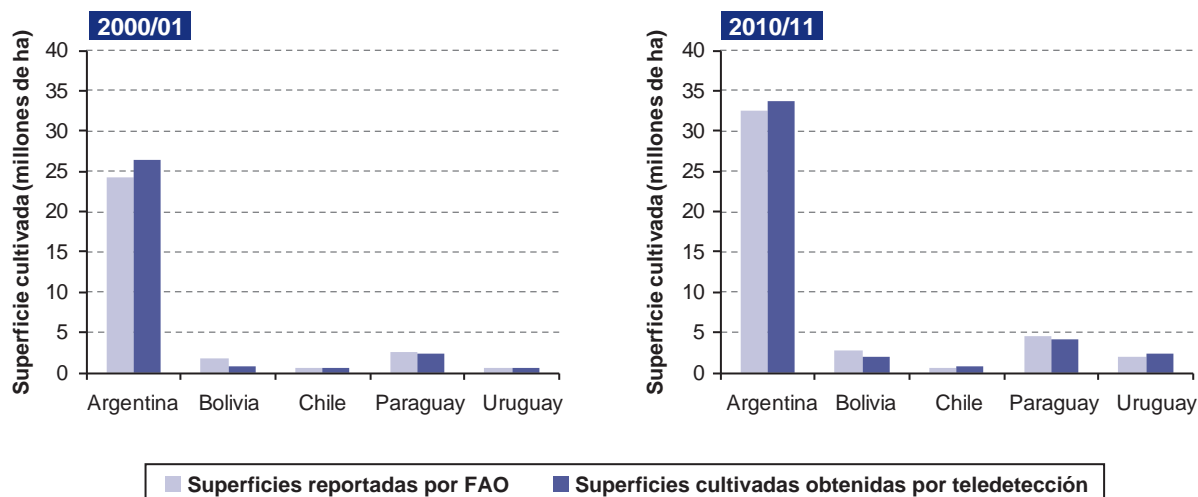


Figura 8. Superficies cultivadas obtenidas por teledetección y reportadas por FAO para los ciclos 2000/01 y 2010/11.

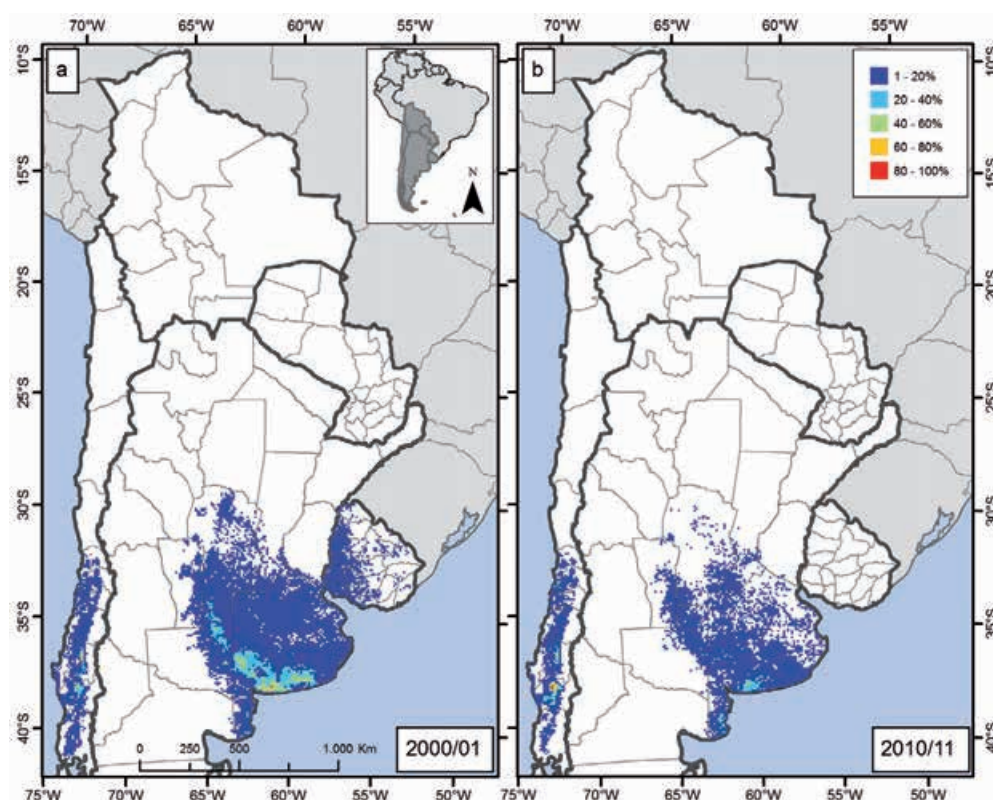


Figura 9. Densidad de cultivos de invierno en dos momentos. El color representa el porcentaje de presencia de cultivos de invierno detectada en la unidad cartográfica (10.000 ha).

Argentina posee más del 80% del total del área cultivada en la región, seguida por Paraguay, Bolivia, Uruguay y Chile. La distribución porcentual ha cambiado entre los periodos analizados, lo que indica que las transformaciones han ocurrido de manera diferencial. El país con mayor crecimiento porcentual con respecto al ciclo 2000/01 fue

Uruguay (265%), seguido por Bolivia (127%), Paraguay (83%), Argentina (35%) y Chile (17%).

La práctica de cultivos de invierno como sistema de cultivos anuales único ha disminuido fuertemente en la región (tabla 1, figs. 9 y 12a). Esta disminución probablemente se

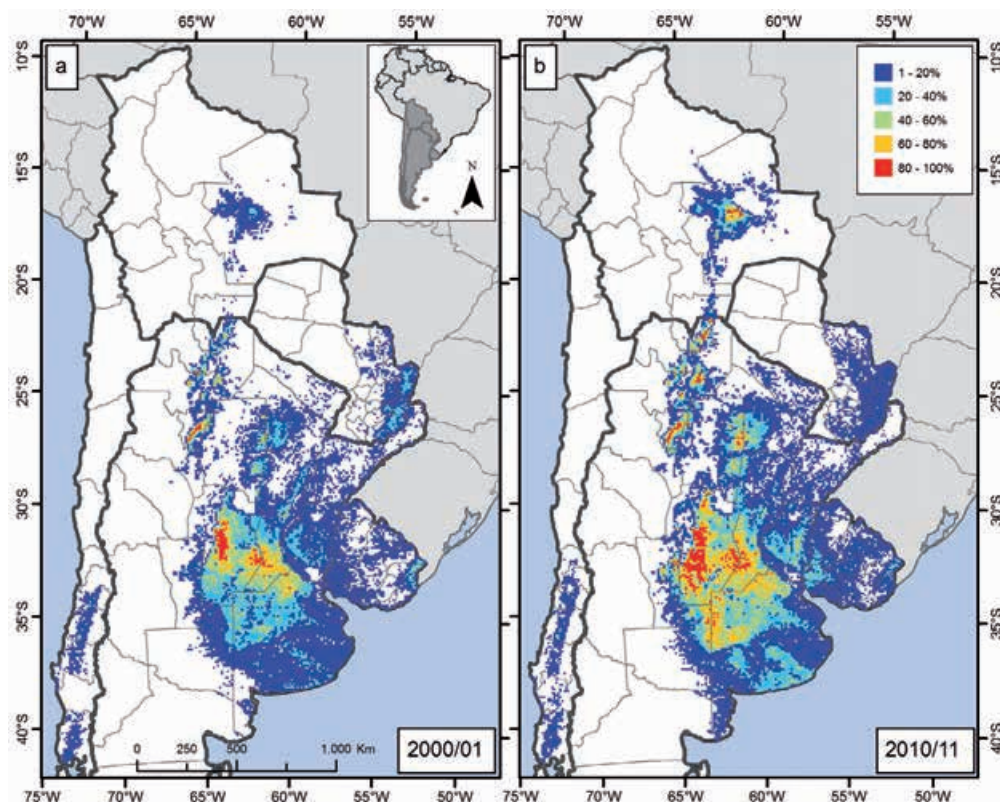


Figura 10. Densidad de cultivos de verano en dos momentos. El color representa el porcentaje de presencia de cultivos de verano detectada en la unidad cartográfica (10.000 ha).

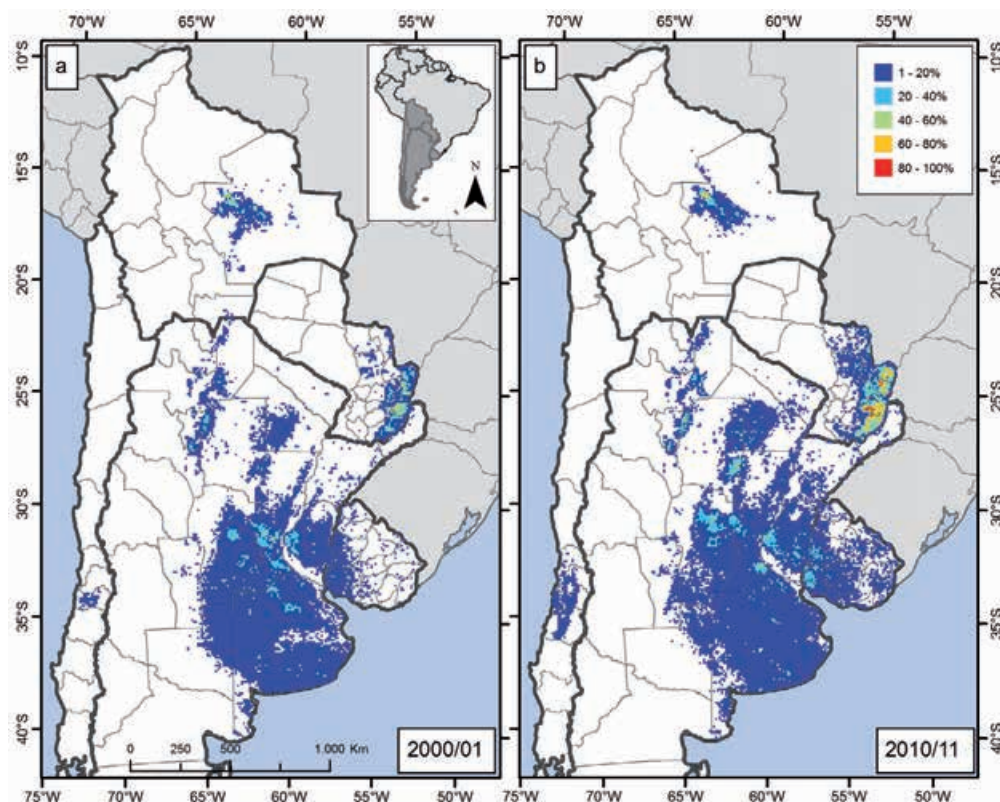


Figura 11. Densidad de doble cultivos en dos momentos. El color representa el porcentaje de presencia de doble cultivo detectada en la unidad cartográfica (10.000 ha).

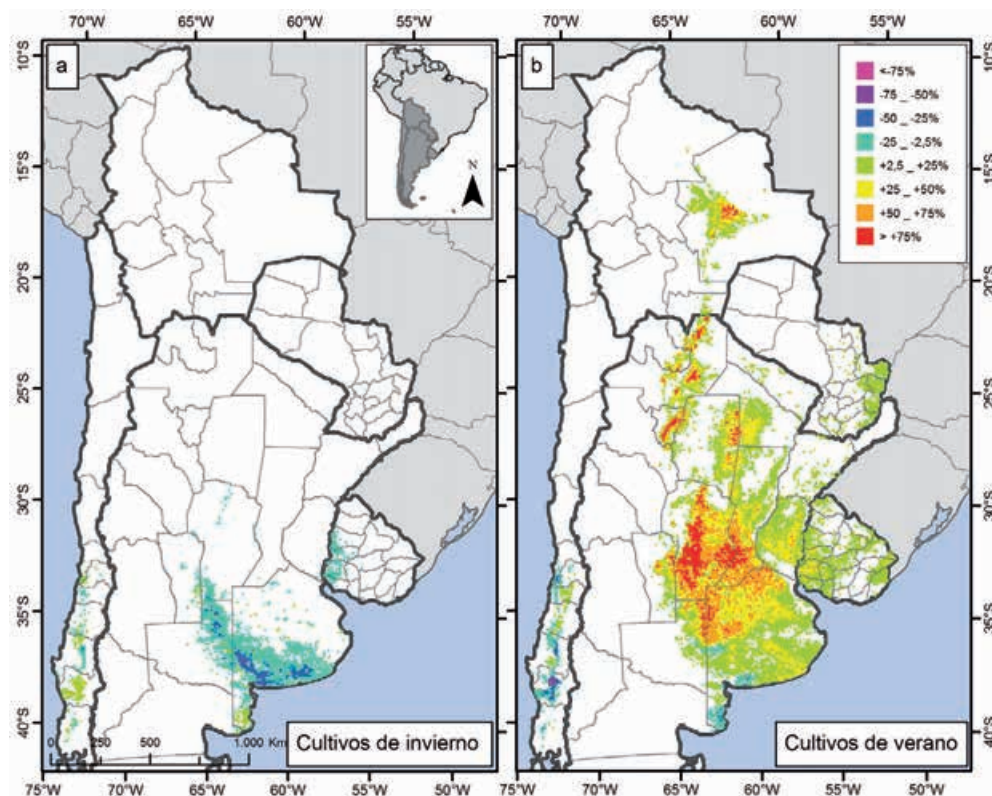


Figura 12. Mapas de cambios en la superficie cultivada en unidades de 10.000 ha ocurridos entre 2000/01 y 2010/11, calculados como $(\text{superficie cultivada en 2010/11} - \text{superficie cultivada en 2000/01}) / 10.000 \text{ ha}$. El color representa el porcentaje de cambio en la presencia de cultivos de invierno (izquierda) y de verano (derecha).

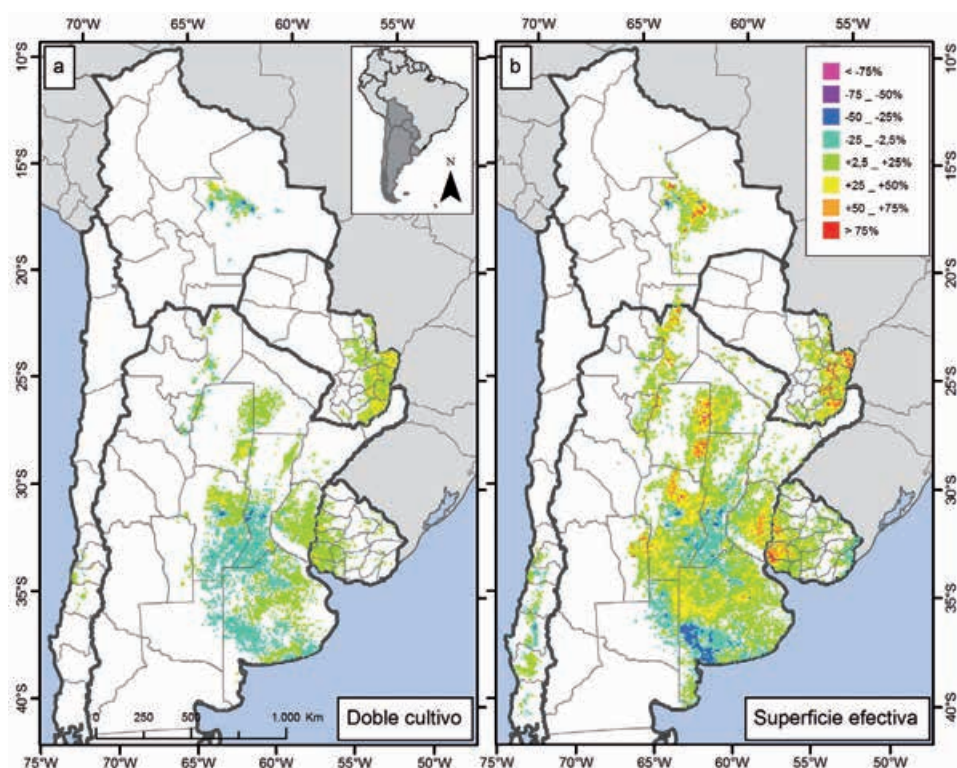


Figura 13. Mapas de cambios en la superficie de doble cultivos y superficie efectiva cultivada en unidades de 10.000 ha ocurridos entre 2000/01 y 2010/11. El color representa el porcentaje de cambio en la superficie de cultivos dobles (izquierda) y en la superficie efectiva de cultivos (derecha)

deba a un doble proceso: a) “reemplazo” de cereales de invierno (trigo y avena) por cultivos de verano (principalmente soja), y b) “intensificación” del uso del suelo mediante la incorporación de un cultivo de verano (soja) al ciclo anual de invierno, transformando el ciclo anual en doble cultivo. Las hipótesis se refuerzan al analizar los cambios ocurridos, en donde puede observarse que el uso “cultivos de verano” se ha incrementado en toda la región pampeana y en la mayor parte del Uruguay (figs. 10 y 12b).

El uso de suelo “cultivos de verano” como sistema de cultivo anual único se ha incrementado en toda la región de estudio, a excepción de algunas zonas en el centro sur de la región pampeana y en Chile (figs. 10 y 12b) probablemente influidas por anomalías secas en la campaña 2010/11 (fig. 7d). Es importante el incremento de la superficie ocurrido en zonas extrapampeanas, como en la región chaqueña argentina y boliviana, el este paraguayo y la Mesopotamia argentina. Los focos de crecimiento más importantes, caracterizados por incrementos de más del 75%, se ubican en el centro norte de la región pampeana, en el Chaco subhúmedo argentino (límite de las provincias de Santiago del Estero y Chaco) y en una línea sur-norte ubicada en la zona de transición entre Las Yungas y el Gran Chaco. Esta línea comienza en la provincia de Tucumán (Argentina) y termina en el oeste del departamento de Santa Cruz (Bolivia), próxima a la ciudad de Santa Cruz de las Sierras (figs. 10 y 12b). Mientras que el incremento de las prácticas de cultivos de verano en la región chaqueña se realiza por reemplazo del bosque nativo o deforestación (avance de frontera agrícola); en la región pampeana de Argentina y Uruguay este crecimiento se produce por reemplazo de actividades ganaderas preexistentes sobre pastizales naturales o pasturas perennes implantadas (Nosetto *et al.*, 2005; Paruelo *et al.*, 2005; 2006).

El uso de suelo de doble cultivo tiene diferentes expresiones desde el punto de vista agronómico. En Argentina, Uruguay y Chile se conforma por la asociación de un cultivo de invierno seguido por otro de verano (principalmente la rotación trigo-soja). Por el contrario, en Bolivia y Paraguay, debido a sus condiciones climáticas, ese sistema se conforma principalmente por dos cultivos que en otras latitudes se desarrollan solamente en verano (soja-soja o soja-maíz). Ambos sistemas tienen particularidades en cuanto al requerimiento de recursos e implicancias agroecológicas y de sustentabilidad.

El sistema de doble cultivo ha sufrido una retracción principalmente en las zonas centro y oeste de la región pampeana, pero incrementos en el resto de la región, con focos importantes en el este paraguayo (figs. 11 y 13a). Es probable que este comportamiento (retracción pampeana y expansión en regiones más cálidas) esté vinculado al reemplazo de cultivos estivales por soja en la región, que expresa el incremento del cultivo de la soja y retracción del cultivo de trigo por su pérdida de rentabilidad. Esta hipótesis explicaría los focos de crecimiento de las prácticas de doble cultivo en Bolivia y Paraguay (sistema soja-soja) y la disminución en zonas templadas pampeanas (cambios del sistema trigo-soja por soja).

La hipótesis de reemplazo de cultivos estivales por soja, y pérdida de competitividad del cultivo de trigo explicaría la configuración del mapa de cambios de superficie efectiva (fig. 13b). En prácticamente toda la región existieron incrementos de la superficie efectiva cultivada, excepto en el sur de Santa Fe y sudoeste de Buenos Aires.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que la metodología utilizada tiene una gran potencialidad para analizar cambios en el uso del suelo de grandes regiones. Bajo el punto de vista cartográfico, estos resultados han sido evaluados solo para una porción del área de estudio (noroeste argentino), pero las estadísticas globales pudieron ser comparadas con otras fuentes de información mostrando discrepancias menores al 10% (fig. 8 y tabla 2). Esto sugiere que la metodología utilizada es robusta para realizar este tipo de análisis. No obstante a ello, quedan abiertas líneas de investigación para poner a prueba hipótesis sobre la distribución geográfica de los errores de estimación y su vinculación con el paisaje.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto FONTAGRO RG-T1654 (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria), de los Programas PNNAT-1128032 del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), FONCYT y con la ayuda de un subsidio del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3095 con el aporte de la US National Science Foundation (Grant GEO-1128040).

El producto de datos MODIS Mod13q1 se obtuvo a través de servidores la NASA: “Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (https://lpdaac.usgs.gov/data_access)”.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCARAZ-SEGURA, D.; PARUELO, J.M.; EPSTEIN, H.E.; CABELLO, J. 2013. Environmental and Human Controls of Ecosystem Functional Diversity in Temperate South America. *Remote Sens.* 5(1): 127–154.
- AUSTIN, A.; PIÑEIRO, G.; GONZALEZ-POLO, M. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry.* 79: 45–60.
- BALDI, G. y PARUELO, J.M. 2008. Land-Use and Land Cover Dynamics in South American Temperate Grasslands. *Ecol. Soc.* 13(2): 6.
- BOLETTA, P.E.; RAVELO, A.C.; PLANCHUELO, A.M.; GRILLI, M. 2006. Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *For Ecol Manage* 228:108–14.
- CHUVIECO, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. 1.º ed. Ariel Ciencia, Barcelona, España. ISBN: 84-344-8047-6.
- CLARK, M.L.; AIDE, M.; GRAU R.; RINER, G. 2010. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sensing of Environment*, Volume 114, Issue 11, 2816–2832.

- COHEN, W.B.; FIORELLA, M.; GRAY, J.; HELMER, E. y ANDERSON, K. 1998. An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 64(4): 293–300.
- COHEN, W.B.; SPIES, T.A.; ALIG, R.J.; OETTER, D.R.; MAIER-SPERGER, T.K.; FIORELLA, M. 2002. Characterizing 23 Years (1972-95) of Stand Replacement Disturbance in Western Oregon Forests with Landsat Imagery. *Ecosystems* 5(2): 122–137.
- COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Int. J. Remote Sens.* 25(9): 1565–1596.
- DI GREGORIO, A.; JANSEN, L. 1998. Land Cover Clasification System. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 1998. ISBN: 92-5-10421.
- DORMANN, C.F. 2007. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16: 129–138.
- DUARTE, C. (coord.) 2006. Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Madrid: CSIC.
- DROS, J.M. 2004. Managing the Soy Boom: Two Scenarios of Soy Production Expansion in South America. Aideenvironment, Amsterdam, The Netherlands.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. State of the World's Forests 2011. FAO, Roma, Italia, 168 pp. FAOSTAT. 2015. Dirección de Estadística de la FAO Economic and Social Development Department, Italy. (<http://faostat3.fao.org> verificado 04/05/2015).
- GAO, X.; HUETE, A.R.; NI, W.; MIURA, T. 2000. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, 74 (2000), pp. 609–620
- GUERSCHMAN, J.P. 2005. Análisis regional del impacto de los cambios del uso de la tierra sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana (Argentina). Tesis de Doctorado. Escuela para Graduados Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 130 pp.
- HANSEN, M. C.; DE FRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G.; SOHLBERG, R.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. 2002. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, pp. 303–319.
- HUETE, A.; LIU, H.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment* 59, pp. 440–451.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 83, pp. 195–213.
- HURLBERT, S.H. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecol. Soc. Am.* 54(2): 187–211.
- JÖNSSON, P. y EKLUNDH, L. 2004. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Comput. Geosci.* 30: 833–845.
- JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *Geoscience and Remote Sensing* 36, pp. 1228 – 1249.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J. R.G. 2002. Special issue on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A new generation of land surface monitoring, *Remote Sensing of Environment* 83, pp. 1–2.
- MITCHELL, A. 2005. The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. ESRI Press. Redlands, California.
- MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S.; SHIMABUKURO, E.; ANDERSON, L.O.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO F.B. 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103:39, pp. 14637–14641.
- NOSETTO, M.D., JOBBAGY, E.G.; PARUELO, J.M. 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 11(7): 1101–1117.
- PARUELO, J.M., E.G. JOBBAGY; SALA, O.E. 2001. Current distribution of Ecosystem Functional Types in temperate South America. *Ecosystems* 4: 683–698.
- PARUELO, J.M.; GUERSCHMAN, J.P.; VERÓN, S.R. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Cienc. Hoy* 15(87): 14–23.
- PARUELO, J.M.; GUERSCHMAN, J.P.; PIÑEIRO, G.; JOBBAGY, E.G.; VERON, S.R.; BALDI, G.; BAEZA, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*. Vol. X N.º 2 pág. 47–61.
- PARUELO, J.M. 2008. Functional characterization of ecosystems using remote sensing. *Ecosistemas* 17(3):4–22.
- PRORENOA-INTA Proyecto de relevamiento de cultivos del Noroeste Argentino. 2012. Monitoreo de cultivos del noroeste argentino a través de sensores. (<http://inta.gob.ar/documentos/monitoreo-de-cultivos-del-noroeste-argentino-a-traves-de-sensores-remotos>, verificado 04/05/2015)
- SELLERS, P.J., BERRY, J.A.; COLLATZ, G.J.; FIELD, C.B.; HALL, F.G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.* 42: 187–216.
- STEININGER, M.K.; TUCKER, C.J.; TOWNSHEND, J.R.G.; KILLEEN, T.J.; DESCH, A.; BELL, V.; ERSTS, P. 2001. Tropical deforestation in the Bolivian Amazon. *Environ. Conserv.* 28, 127–134.
- TOWNSHEND, J.; JUSTICE, C; GURNEY, C.; MCMANUS, J. 1992. "The impact of misregistration on change detection" *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol. 30, no. 5, pp. 1054–1060.
- VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. 1997. Human domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277: 494–499.
- VOLANTE, J.N.; ALCARAZ-SEGURA, D.; MOSCIARO, M.J.; VIGLIZZOD, E.F.; PARUELO, J.M. 2012. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154 (2012) 12– 22.
- WARDLOW B. D.; EGBERT S. L.; KASTENS J, H. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for Crop Classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* 108:3, pp. 290–310.
- XIUWAN, C. 2002. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *Int. J. Remote Sens.* 23(1): 107–124.
- ZAK M. R.; CABIDO, M.; HODGSON, J. 2004. Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina have a future? *El-sevier, Biological Conservation*, 120. (2004) 589–598.